國家溫室氣體排放清冊報告之農業土壤排放源介紹

農試所產服中心 黃家康

一、前言

隨著全球對於淨零議題的關注，我國於2021年4月22日世界地球日由蔡英文前總統宣示於2050年達成淨零排放，並且於2023年2月15日將溫室氣體減量及管理法(以下簡稱溫管法)修法為氣候變遷因應法，修正通過後，該法之施行細則亦於2023年12月29日完成修正，其中有關國家溫室氣體排放清冊報告的發布期程，由原先溫管法時期的每年12月底提前至每年6月30日前，顯見我國政府對於推動淨零之決心。

聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)於1994年生效，規範締約國有義務提供相關履行的訊息，包含編製溫室氣體排放源與移除匯的清單，聯合國政府間氣候變化專門委員會(IPCC)亦發布盤查指南，協助締約國編製國家溫室氣體排放清冊報告(NIR, National Inventory Report)，我國雖非UNFCCC締約國亦非聯合國會員國，但我國編製之國家溫室氣體排放清冊報告，仍係依據IPCC盤查指南之架構及計算方式。

作　　者：黃家康助理研究員
連絡電話：04-23317655

作為唯一可檢視淨零是否達成的重要文件，我國自2014年起即開始發布國家溫室氣體排放清冊報告，統計自1990年起至發布前二年之溫室氣體排放資料。2024年度係首次依據新修正通過之氣候變遷因應法及其施行細則規範之期程完成發布作業，目前各年度編製之清冊，係依照IPCC 1996年版盤查指南的架構，其中與農業活動有關的內容主要為第五章農業部門及第六章土地利用、土地利用變化及林業部門，農業部門內應探討的排放源可分為與畜牧有關之禽畜腸胃發酵及禽畜糞尿處理、與農糧有關之水稻種植、農業土壤、尿素施用、作物殘體燃燒、石灰處理等。依據2024年發布之國家溫室氣體排放清冊報告，2022年農業部門各排放源佔比如圖一所示，本文僅先就清冊中農業部門中之排放量最大的農業土壤排放源進行探討。

二、農業土壤溫室氣體之計算方式

農業土壤為氧化亞氮主要排放源之一，氧化亞氮的暖化潛勢為265，遠高於二氧化碳和甲烷。我國國家溫室氣體排放清冊中對於氧化亞氮排放量的計算，

係以排放係數(即每單位氮素投入量可造成的氧化亞氮排放量)乘以活動數據(即氮素投入量)而得。

農業土壤造成之氧化亞氮排放可分為直接與間接，直接排放係因氮素投入於土壤中，使土壤有效性氮增加、脫氮量增加而形成；間接的排放途徑則有揮散及淋洗/逕流兩種，揮散係因施用含有氮素之肥料造成之氨(NH_3)及氮氧化物(NO_x)揮散，經大氣沉降作用回到土壤或水體再形成氧化亞氮；淋洗或逕流是在降雨量大於蒸發量或有灌溉的地區造成之氮損失。

為計算農業土壤的直接排放量，須先取得排放係數與活動數據。目前國家溫室氣體排放清冊中所採用的農業土壤氧化亞氮排放係數，係依據 IPCC 2006 年版盤查指南之建議值。表一列出清冊中農業土壤氧化亞氮直接排放係數，表二則為農業土壤揮散、淋洗/逕流係數及排放係數。

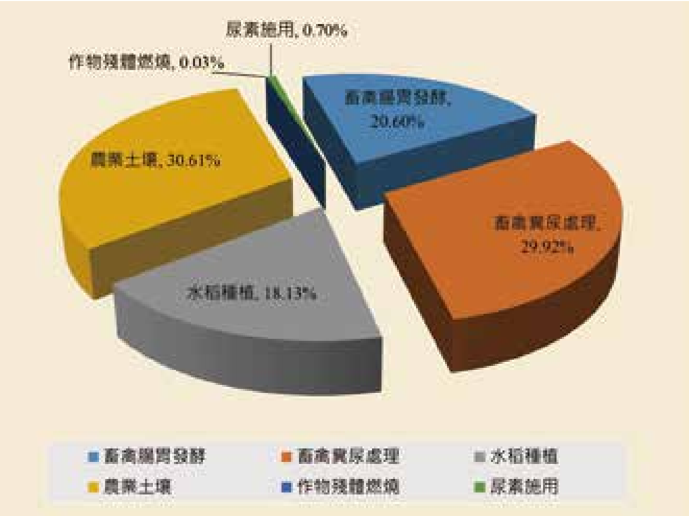
計算農業土壤排放的氧化亞氮因其排放原理主要涉及氮的投入，故需要考量的活動數據包含：化學肥料之含氮量、有機肥料之含氮量及作物殘體含氮量，IPCC 指南雖有土地利用造成礦質土壤中土壤有機碳損失造成的礦化氮量、有機土壤造成之排放及放牧牲畜糞尿投入到放牧土壤等項目，但因我國並不適用，故未予納入統計。有關國家清冊中氧化亞氮排放量計算，詳述於下一段落。

三、我國農業土壤產生之氧化亞氮

我國計算農業土壤造成之氧化亞氮排放，所需活動數據來自於政府統計資料，包含：化學肥料施用量、有機肥料施用量及作物殘體量(如表三)。

化學肥料施用量，引用自農糧署臺灣地區肥料產銷量(值)統計，並透過含氮量計算氮投入量；有機氮來源的含氮量引自綠色國民所得帳禽畜舍墊料及堆肥，經乾物重及含氮量計算氮素投入量。

區分用於水田及旱田之氮素投入量係參考農糧署執行稻穀生產成本調查中所統計之每公頃水田肥料用量(包含化學肥料及有機肥料)，推估水田所用之化學肥料用量及有機肥料用量，經含氮量計算後，得出用於水田之氮素投入量。



圖一、2022年農業部門溫室氣體各排放源占比。

資料來源:國家溫室氣體排放清冊報告，2024。

表一、農業土壤直接排放係數(EF)及其不確定性範圍

類別	農業土壤直接排放係數（kg N_2O - N/kg N）	不確定性範圍
旱田	0.01	0.003-0.03
水田	0.003	0.000-0.006

資料來源：IPCC 2006年版指南。

表二、揮散、淋洗/逕流係數及排放係數整理

因子		IPCC 2006預設值及其不確定性範圍（kg N_2O - N/kg N）	
揮散	化學肥料之揮散係數	0.10	0.03-0.3
	有機肥料之揮散係數	0.20	0.05-0.5
	揮散之排放係數	0.010	0.002-0.05
淋洗/逕流	淋洗係數	0.30	0.1-0.8
	淋洗之排放係數	0.0075	0.0005-0.025

資料來源：IPCC 2006年版指南。

表三、2022年度農田土壤化學肥料總氮投入量計算

含氮肥料類別	硫酸銨	尿素	硝酸銨鈣	複合肥料
肥料施用量(公噸)	84,235	30,513	750	616,190
含氮比例	21%	46%	20%	17.3%
氮施用量(公噸)	17,689.35	14,035.98	150	106,600.87
化學肥料總氮投入量(公噸)	138,476.2			

資料來源：臺灣地區肥料產銷量值。

表四、2022年度有機肥料總氮投入量計算

含氮肥料類別	用量(公噸)	乾物比	含氮量	有機肥料總氮用量(公噸)
禽畜舍墊料	129,214	0.78	2.4%	49,002.50
堆肥	2,488,441			

資料來源：綠色國民所得帳。

表五、2022年度水田、旱田經由施肥之總氮投入量計算

總氮投入量(公噸)		水田氮投入量(公噸)			旱田氮投入量(公噸)
		一期作	二期作	總計	
化肥	138,476.2	33,718.81	20,498.14	54,216.95	84,259.25
有機	49,002.50	168.64	36.49	205.13	48,797.37
總計				54,422.08	133,056.62

資料來源：農業部農糧署。

將總氮素投入量扣除用於水田之氮素投入量後，即為投入旱田之氮素投入量。作物殘體含氮量於水田係採用綠色國民所帳水稻殘體掩埋量；旱田的部分是農業統計年報的作物產量，以乾物質比、殘體比及含氮量計算出氮素投入量。

以尿素為例，2022年全台使用量為30,513公噸，以含氮量46%計算，使用尿素的氮投入量即為14,035.98公噸，表三、表四分別為化學肥料及有機肥料總氮投入量計算，表五為區分水田和旱田施氮量之計算。作物殘體投入回農田造成的氧化亞氮排放，如表六所示。表七為農業土壤直接排放之總和，2022年度我國的排放量為677千公噸二氧化碳當量。

農業土壤的間接排放部分，揮散的計算，須考量的項目包含化學肥料含氮量及有機肥料含氮量，乘以各自之揮散係數0.1及0.2，再乘揮

散之排放係數0.01。以尿素為例，尿素的氮投入量為14,035.98公噸，經計算約有5,845公噸的二氧化碳當量排放，換算每公斤尿素施用，會有0.1916公斤二氧化碳當量透過揮散排放至大氣中。算式如下：

14035.98×0.1×0.01×44÷28×265=5844.9831

其中乘以44再除以28為將氮排放量換算為氧化亞氮排放量；乘以265係將氧化亞氮排放量轉換為二氧化碳排放當量。

淋洗/逕流須同時考量化學肥料、有機肥料及作物殘體之氮投入量，乘以淋洗係數0.3再乘以淋洗之排放係數0.0075，即為淋洗/逕流所產生的氧化亞氮排放。以尿素為例，2022年尿素之氮素投入量為14035.98公噸，尿素因淋洗/逕流排放的氧化亞氮約有13151.2公噸二氧化碳當量(算式為14035.98×0.3×0.0075 ×44÷28×265)，即每公斤尿素施用會有0.43公斤之二氧化碳當量排放。

2024年度發布之清冊顯示，2022年之農業土壤因揮散造成之氧化亞氮排放為 371.63 公斤(98.48 千公噸二氧化碳當

表六、2022年度農業土壤作物殘體總氮投入量計算

作物	產量類別	產量(公噸)	殘體量(公噸)	含氮量	氮投入量(公噸氮)
水稻殘體	乾物		1,817,7921	0.007	12,724.5
非固氮穀類作物(不含水稻)	乾物	109,508	147,442	0.007	1,032
非固氮穀類作物	鮮物	130,561	43,947	0.008	352
固氮作物	乾物	64,891	108,063	0.008	865
	鮮物	89,974	36,224	0.016	580
根莖類作物	鮮物	720,932	65,028	0.016	1,040
固氮綠肥	鮮物	998,986	998,986	0.0048	4,795
非固氮綠肥	鮮物	124,947	124,947	0.0021	262
非固氮牧草	鮮物	980,032	33,0602	0.015	496
總計					22,146

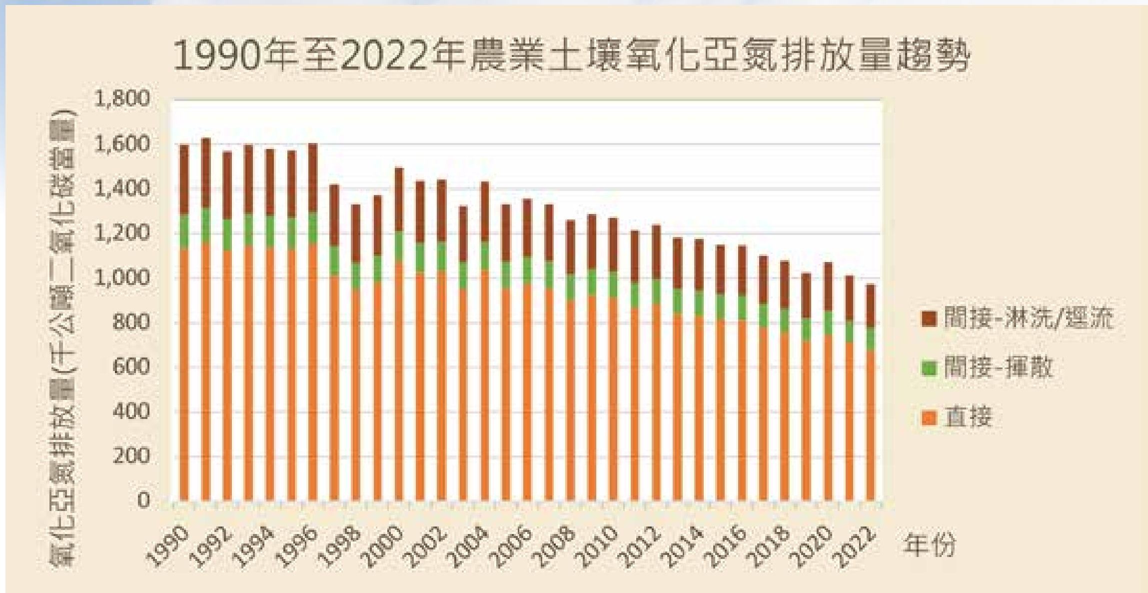
資料來源：2023年綠色國民所得帳、2023年農業統計年報。

備註：1. 水稻殘體量自2001年起直接引用自綠色國民所得帳，未透過水稻產量推估。2. 非固氮牧草更新頻率係參考農業部補助基準:「同一田區3年內以1次為限」，假定為3年1次。

表七、2022年度農業土壤直接排放計算(單位：公斤)

氮素來源		化學肥料	有機肥料	作物殘體
水田	氮投入量(Kg)	54,216.95	205.13	12,724.5
	N_2O-N係數	0.003		
	N_2O-N排放量	162.65	0.62	38.17
旱田	氮投入量(Kg)	84,259.25	48,797.37	9,421.5
	N_2O-N係數	0.01		
	N_2O-N排放量	842.59	487.97	94.22
N_2O-N合計		1,626.22		
分子量換算		44/28		
N_2O排放量		2,555.49 Kg N2O (677千公噸CO_2e)		

資料來源：2023年臺灣地區肥料產銷量(值)、綠色國民所得帳、農業統計年報。



圖二、1990年至2022年農業土壤氧化亞氮排放量。資料來源: 2024國家溫室氣體排放清冊報告。

表八、2022年度農業土壤氧化亞氮間接排放量計算

	化學肥料	有機肥料	作物殘體
氮投入量(Kg)	138,476.2	49,002.50	22,146
揮散係數	0.1	0.2	
揮散之N_2O-N係數	0.01		
揮散N_2O-N排放量	138.48	98.01	
分子量換算	44/28		
揮散總排放量	371.63 kg N_2O (98.48 千公噸CO_2e)		
淋洗係數	0.3		
淋洗之N_2O-N係數	0.0075		
淋洗/逕流N_2O-N排放量	311.57	110.26	49.83
分子量換算	44/28		
淋洗/逕流總排放量	741.17 kg N_2O (196.41 千公噸CO_2e)		

資料來源：同表七。

表九、農業土壤排放量加總 (單位 kg N_2O)

排放方式		化學氮肥	有機肥料	作物殘體	總計
直接	水田	255.59	0.97	59.98	316.54
	旱田	1,324.07	766.81	148.06	2,238.94
間接	揮散	217.61	154.02	-	371.63
	淋洗/逕流	489.61	173.27	78.30	741.18
總計		2,286.88	1,095.07	286.34	3,668.29(972千公噸CO_2e)

資料來源：同表八。

量)，2022年度之淋洗/逕流造成之氧化亞氮排放為741.17公斤(196.41 千公噸二氧化碳當量)，詳如表八。

將直接排放與間接排放相加後即為農業土壤排放源總量，2024年度統計2022年之農業土壤氧化亞氮排放為3,668.29 kg (972千公噸二氧化碳當量)，計算方式如表九所示。歷年農業土壤之排放量如圖二所示，整體趨勢呈現下降，與1990年相比，已減少將近40%，主要與農業活動減少有關。

四、後續改善規劃

(一) IPCC 自2019年發布精進版的指南後，已將2006年版的預設值值及不確定性進行大幅度更新，部分排放係數更依不同氣候條件發佈特定係數供不同氣候的國家引用。目前我國113年清冊所採用之IPCC預設係數，於不同部門間採用情形不盡相同，農業部門目前仍採IPCC 2006之預設係數。考量IPCC 2019之精進版指南於量測精度及適當之分層劃分，均較2006版之指南細緻，後續凡涉及依據方法一之溫室氣體計算方式，排放係數建議應採用2019年版之係數。

(二) 建立農業土壤直接氧化亞氮排放之本土係數：由於我國清冊目前在農業土壤採用之氧化亞氮排放係數為IPCC之預設值，僅區分出旱田及水田兩項，目前農業部及所屬試驗改良場所正透過執行淨零綱要計畫建立本土之氧化亞氮排放係數，後續將依據試驗結果，將大類作物之量測結果歸整，取代農業土壤直接排放之IPCC預設值。

五、結語

淨零的腳步，自IPCC第六次評估報告發布以來，益受各界重視。但真正要推動淨零，必須先瞭解國家層級溫室氣體排放的狀況，方能規劃適當之減量措施，以我國第二期農業部門溫室氣體排放管制行動方案為例，當中列有推動合理化施肥之項目，即係針對農業土壤排放源投入減量之措施，以尿素為例，減少1公斤之尿素使用，在本項排放源可減少1.167- 2.538公斤的二氧化碳當量，具相當之減量效益。我國國家溫室氣體排放清冊報告之架構及計算方式均係參考IPCC指南，具有可比較性、一致性等原則。透過後續不斷補強本土排放係數，將可更為精準評估我國農業部門溫室氣體排放總量及主要排放源，作為後續溫室氣體減排規劃之重要參考。

六、參考文獻

環境部，2024國家溫室氣體排放清冊報告，2024。

行政院農業委員會，中華民國112年農業統計年報，2023。

行政院主計總處，綠色國民所得帳編製報告，2023。

IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.